

文章编号: 1672-2892(2010)05-0577-05

## 多带 OFDM 超宽带系统高性能分组检测器设计

孙金芝<sup>1a</sup>, 王钱矾<sup>1b</sup>

(1.北京交通大学 a.轨道交通控制与安全国家重点实验室; b.电子信息工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 针对多带 OFDM 超宽带(MB-OFDM UWB)系统, 依据其物理层国际标准 ECMA-368, 提出了一种高性能的分组检测器。在改进传统互相关算法的基础上, 通过累积多径能量, 该分组检测器可以同时实现分组检测和符号精定时。仿真结果表明, 与已有的分组检测算法相比, 新方法具有更低的分组检测错误概率, 同时也改善了符号精定时的准确度。

**关键词:** 多带 OFDM 超宽带系统; 分组检测; 符号定时; 累积多径能量; ECMA-368 标准

**中图分类号:** TN911.23

**文献标识码:** A

## A high performance packet detector for MB-OFDM UWB System

SUN Jin-zhi<sup>1a</sup>, WANG Qian-fan<sup>1b</sup>

(1a.State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety; 1b.School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** A high performance packet detector for MB-OFDM UWB(Multiband Orthogonal Frequency-Division Multiplexing Ultra Wideband) system is proposed according to MB-OFDM UWB physical international standard ECMA-368. On the basis of conventional cross correlation, the detector can complete packet detection and fine symbol timing at the same time by accumulating multi-path energy. Simulation results show that the new detector has a lower packet detect error rate and a higher symbol timing precision compared with the existing schemes.

**Key words:** MB-OFDM UWB; packet detection; symbol timing; accumulating multi-path energy; standard ECMA-368.

超宽带(UWB)无线通信技术以高传输速率、高时间分辨率和低功耗等优点而受到人们的青睐, 并已成为短距离无线通信领域的研究和开发热点。而正交频分复用(OFDM)技术, 由于具有频谱利用率高、抗多径能力强、信道均衡相对简单等优点, 成为 UWB 主流实现方案之一。高速超宽带国际标准 ECMA368<sup>[1]</sup>的出现进一步推动了 UWB 的规范化和实用化进程。由于 MB-OFDM 系统的符号间隔极小, 传输速率极高, 信道密集多径, 信噪比变化范围大等特性, 同步技术成为 MB-OFDM 接收系统中至关重要的问题。

在传统 OFDM 系统同步方案中, 有两类广泛应用的基本算法: 自相关(Auto-Correlation, AC)类和互相关(Cross-Correlation, CC)类。自相关算法通常用于分组检测和符号粗同步, 性能易受信噪比影响, 其代表是 SC (Schmidl&Cox)算法<sup>[2]</sup>; 而互相关类能同时实现分组检测和符号精定时, 这对于高数据吞吐量的 MB-OFDM UWB 系统来说是很有效的, 加之 CC 方案在低信噪比下也具有很好的鲁棒性, 因此, 绝大部分已有的分组检测算法研究都是基于传统 CC 方案, 如文献[3]。由于单纯的 CC 方案易受多径及频偏的影响, 因此, 在为 MB-OFDM UWB 系统设计同步方案时, 更多的是对 CC 方案进行改进。文献[4-5]中都提出了将传统 CC 与复乘法器结合, 以降低噪声的影响, 这种方案在一定程度上改进了分组检测性能, 但符号精定时的性能并不理想。由于 UWB 信道的密集多径特性, 且最强多径成分往往在第一有效径之后出现, 仅通过复乘运算, 仍然很容易导致错误的定时, 尤其是在 CM4 信道下。

本文在文献[4-5]的基础上提出了一种新的分组检测算法, 通过累积多径能量, 进一步改善分组检测及符号精定时的性能。使得在最差的信道环境下, 即 SNR 为 -8.4 dB, CM4 信道环境下<sup>[6]</sup>, 也能够以大于 90% 的概率在 5.625  $\mu$ s(18 个符号间隔)内检测出到达的分组<sup>[1]</sup>, 同时将精同步的定时偏差锁定在 1~3 个样值。

收稿日期: 2010-01-21; 修回日期: 2010-03-25

基金项目: 北京交通大学科技基金资助项目(2006XZ001)

## 1 MB-OFDM UWB 系统模型

MB-OFDM UWB 物理层国际标准 ECMA-368<sup>[1]</sup>将其可用的 7 500 MHz 频段划分为 14 个带宽为 528 MHz 的频带(Band)及 6 个带组(Band Group, BG), 如图 1(a)所示。OFDM 符号根据 TFC(Time-Frequency Code)类型的不同以跳频或定频方式在每个带组内传输, 共有 10 种 TFC 类型, 图 1(b)为 TFC1 时的跳频方式。ECMA-368 标准还规定数据分组由前导序列、头序列以及数据部分构成, 其中, 前导由 30 个重复符号组成, 包括 21 个分组同步(Packet Synchronization, PS)符号、3 个帧同步(Frame Synchronization, FS)符号以及 6 个信道估计符号。ECMA-368 标准同时还规定要利用其中的 PS 符号进行分组检测及符号定时, 且对分组检测性能作了规定: 在 5.625  $\mu$ s(18 个 PS 符号)内, 能够以大于 90%的概率检测出到达的分组。

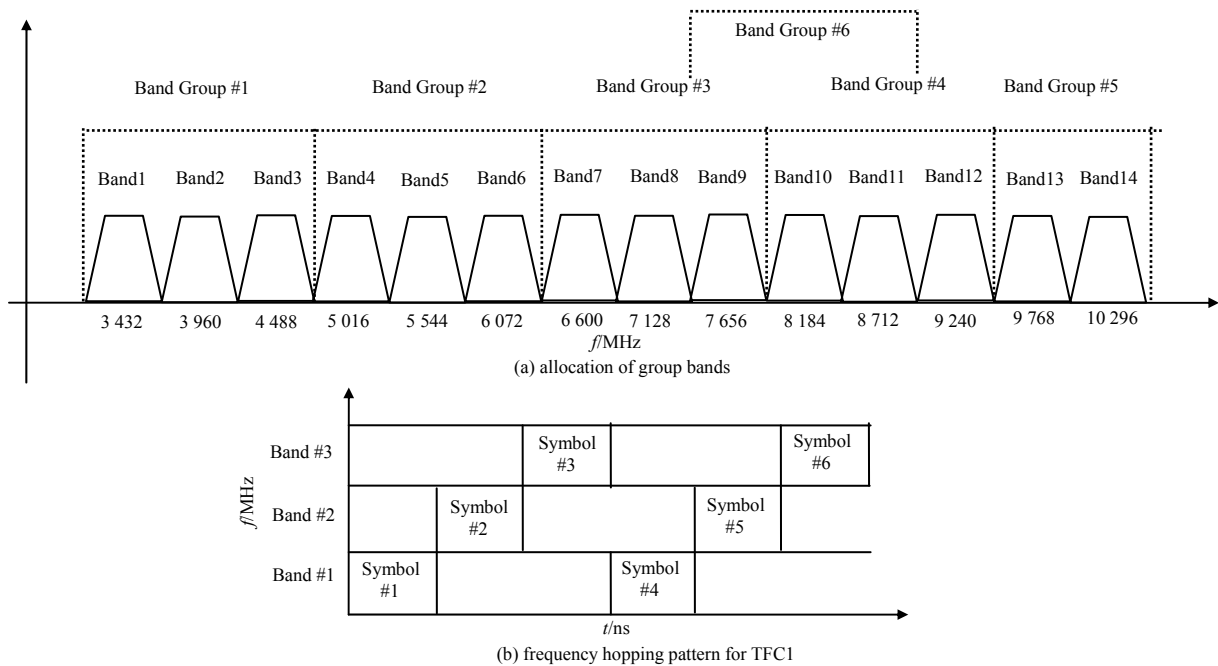


Fig.1 MB-OFDM UWB system specified by standard ECMA-368  
图 1 ECMA-368 标准规定的 MB-OFDM UWB 系统

与一般 OFDM 系统不同, 在 MB-OFDM UWB 系统中, 未检测到分组之前, 接收机将扫描所有频带, 也就是停留在某一频带“侦听”可能到来的分组一定时间周期, 如果没有检测到分组, 则转换到另一个频带继续侦听<sup>[7]</sup>。由于跳频传输, 对于 TFC1~TFC4, 每个频带只能利用 6 个 PS 符号进行分组检测, 由于 TFC5~TFC7 采用定频传输, 每个频带可以利用的 PS 符号数是完整的 18 个, 对于 TFC8~TFC10, 每个频带则可以利用 9 个 PS 符号。

对于传统的 OFDM 系统, 使用 2 个阶段实现定时同步: 粗同步和精同步。粗检测利用 AC 运算来实现分组检测并获得一个粗略的定时信息; 精同步采用 CC 运算, 它将接收信号和一个已知的训练序列作互相关, 可以精确地找出一个分组的起始点。

CC 运算不仅能够检测分组的开始, 同时还能够精确地确定 FFT(Fast Fourier Transform)窗口的开始位置, 因此, CC 方案更适合 MB-OFDM UWB 系统。另外, MB-OFDM UWB 信号的功率谱密度必须低于 -41.25 dBm/MHz, 接收机工作的信噪比范围为 -8.4 dB~24 dB, 对于分组检测器来说需要有很高的噪声免疫力。虽然 CC 方案对噪声具有鲁棒性, 但在 -8.4 dB 这样低的信噪比环境下, 性能也会受到很大损伤, 因此, 必须要对传统 CC 方案做有效的改进。

## 2 分组检测器设计

分组检测方案框图如图 2 所示。图中,  $r(k)$  表示时域接收样值;  $C(k)$  ( $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ ) 为文献[1]中规定的前导系数, 也就是 PS 符号;  $N$  为 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)点数, 即子载波数, 大小为 128;  $M$  为

一个 OFDM 符号中包含的时域样值总数, 包括循环零缀 ( $N_{ZP} = 32$ ) 和保护样值 ( $N_{GI} = 5$ ), 共 165 个样值。

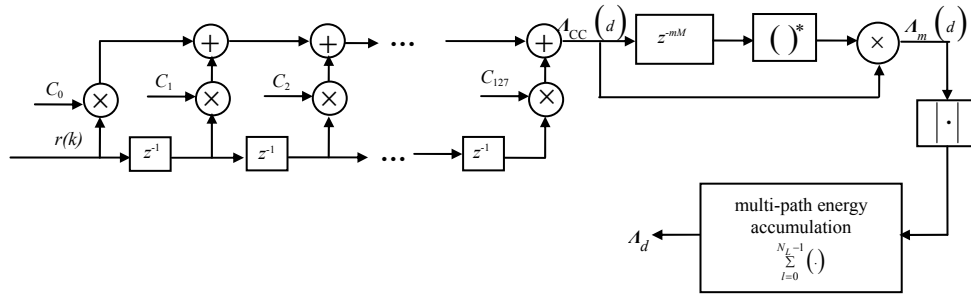


Fig.2 Block diagram of the packet detector

图 2 分组检测器框图

本文提出的分组检测器首先将接收信号  $r(k)$  与已知的前导符号  $C(k)$  作互相关, CC 输出  $A_m(d)$  为:

$$A_{cc}(d) = \left| \sum_{k=0}^{N-1} r(k+d)C^*(k) \right| \tag{1}$$

为了增加互相关检测器的抗噪声能力, 将 CC 的输出作延迟复乘运算<sup>[4-5]</sup>:

$$A_m(d) = \sum_{k=0}^{N-1} A_{cc}(d)A_{cc}^*(d+mM) \tag{2}$$

根据采用的 TFC 的不同,  $A_{cc}(d)$  的延迟参数  $m$  也不同,  $TFC=1,2$  时,  $m=3$ ;  $TFC=3,4$  时,  $m=1,6$ ;  $TFC=5\sim7$  时,  $m=1$ ;  $TFC=8\sim10$  时,  $m=2$ 。由于在作分组检测时, 接收机无法知道发射端所用的 TFC 类型, 进而也无法确定延迟参数  $m$  的具体值, 但可以看出, 延迟参数  $m=6$  时, 可以满足所有 TFC 类型, 也就是说, 不必知道具体 TFC 类型也可以完成分组检测。因此, 在本文的设计中, 将延迟参数固定为 6。

由于 UWB 信道模型是典型的密集多径, 且最强多径成分往往在第一有效径之后出现, 容易导致错误的定时。为了防止接收机错误锁定到最强多径上, 本文进一步利用累积多径能量的方法来降低多径信道对分组检测性能的影响, 表达式如下:

$$A(d) = \sum_{l=0}^{N_L-1} A_m(d+l) \tag{3}$$

式中  $N_L$  为信道多径长度,  $N_L$  要足够大以累积绝大部分的信道多径能量, 但因为信道最大多径延迟小于循环前缀的长度, 所以  $N_L \leq N_{ZP}$ 。当分组检测器输出  $A(d)$  超过预先设定的阈值时, 则判定分组到达, 同时, 使得  $A(d)$  取得最大值的点即为符号精定时估计点:

$$\hat{d} = \arg \max_d \{A(d)\} \tag{4}$$

对于信道多径长度  $N_L$  的确定, 可以直接将其设为循环零缀  $N_{ZP}$  的长度, 但这样做会导致不必要的复杂度增加, 因为信道的最大多径延迟小于循环零缀的长度。本文将用仿真的方法来确定  $N_L$  的值, 在后面的仿真中将具体介绍。

### 3 性能仿真

为了验证本文提出的分组检测器的性能, 仿真了带组 1 内的 3 个频带, 并采用 TFC1 时的跳频方式, 信道模型为 IEEE 802.15.3a 建议的信道模型: CM1~CM4<sup>[6]</sup>。UWB 接收机的信噪比范围为  $-8.4 \text{ dB} \sim 24 \text{ dB}$ <sup>[1]</sup>, 由于文献 [1] 中规定载波频偏在 20 ppm 范围内, 在仿真分组检测器的性能时, 加入的频偏最大允许值为 40 ppm。下面分别从阈值范围、最大正确接收概率、 $N_L$  的设定以及符号精定时的性能 4 个方面说明同步方案的有效性。

阈值范围 (Threshold Range, TR) 也就是在  $5.625 \mu\text{s}$  内能够以大于 90% 的概率检测到分组的所有阈值, 即

$$TR = \left\{ \max \{ \lambda \} - \min \{ \lambda \} \mid P_{\text{Normal}}(\lambda) \geq 0.9 \right\} \tag{5}$$

式中  $P_{\text{Normal}}(\lambda)$  是当阈值设为  $\lambda$  时分组正确检测概率, 也就是无分组时不会虚警, 有分组时也不会漏警的概率。

最大正确接收概率 (Maximal Correctly Receiving Probability, MCRP) 即在最佳阈值下所能达到的最大分组检测概率, 此时, 虚警概率和漏警概率都达到最低。

$$MCRP = \max_{\lambda} \{P_{\text{Normal}}(\lambda)\} \quad (6)$$

图3给出了本文提出的分组检测方案在CM1信道下,信噪比为-8.4 dB时,不同阈值下的分组检测性能(False-虚警概率; Miss-漏警概率; Normal-分组正确接收概率; PDER-分组检测错误概率)。从图3(a)可以看出,新方案的TR为0.5~0.9,图3(b)显示了当阈值 $\lambda = 0.7$ 时,分组检测错误概率(Packet Detection Error Rate, PDER)达到最低,相应的分组正确接收概率达到最大值0.998,即0.7为新方案在CM1信道下的最佳阈值。

表1给出了已有分组检测方案和本文提出的方案在CM1和CM4信道下的阈值范围及分组最大正确接收概率MCRP。可以看出,对于传统CC方案及其改进方案1,没有一个阈值能够保证以大于90%的概率正确检测到分组;改进方案2的TR仅为0.1,而新方案与已有方案相比具有更大的TR,同样也具有最大的MCRP,更重要的是经过累积多径能量,最佳阈值在不同信道模型下相同,然而传统CC方案及改进方案1的最佳阈值却并不相同。

图4给出了新方案在设定的最佳阈值为0.7,信噪比为-8.4 dB,信道多径长度 $N_L$ 不同时的分组正确接收概率,仿真了1000个分组。由于累积多径能量,CM1和CM4下的性能类似。由图4可以看出,从 $N_L=0$ 到 $N_L=15$ ,分组正确检测概率不断上升,之后保持平稳,这是因为当 $N_L$ 增加到15时,可以累积绝大部分信道多径能量。因此,可以将 $N_L$ 设为15。

图5给出了-8.4 dB,CM1信道下不同分组检测方案的符号定时偏移量分布,图中包括偏移超过6个样值的情况。由图5可以看出,新方案可以将定时偏差锁定在1~3个样值。而传统CC方案及文献[4-5]中的改进方案的精定时性能很不理想,样值偏移数较大,尤其是偏移超过6个样值的情况。

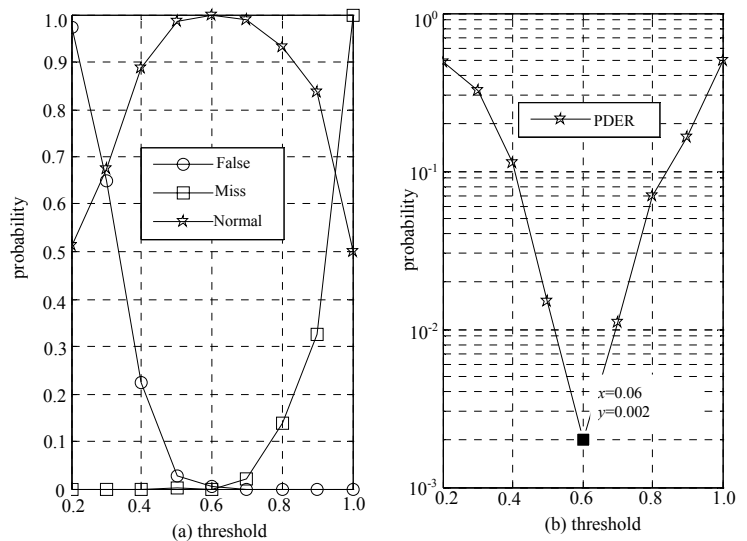


Fig.3 Packet detecting performance under different thresholds  
图3 不同阈值下的分组检测性能

表1 不同方案性能比较(CM1,-8.4 dB)

channel model	traditional CC		CC+multiplex		new scheme	
	CM1	CM4	CM1	CM4	CM1	CM4
TR	no	no	0.80-0.90	no	0.5-0.8	0.70-0.80
best threshold	0.75	0.80	0.85	0.70	0.60	0.70
MCRP	0.856 7	0.715 0	0.960 0	0.870 0	0.998 0	0.940 0

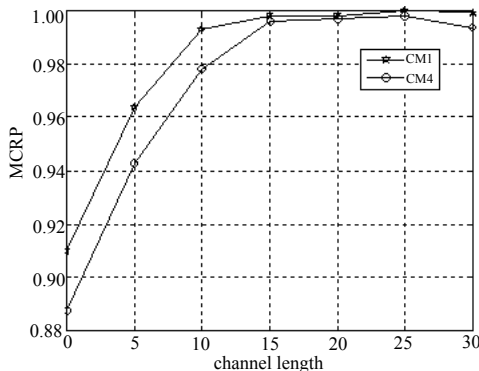
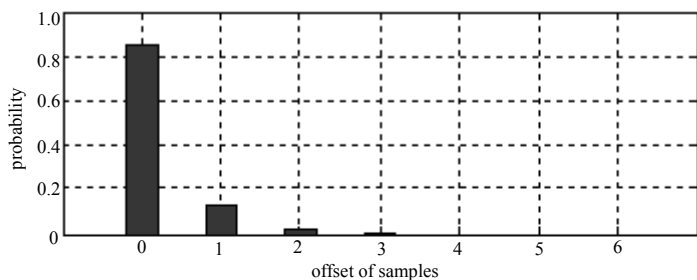
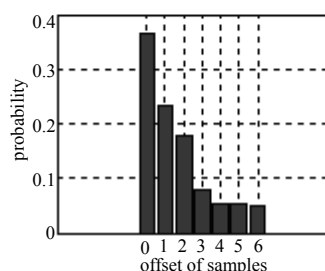


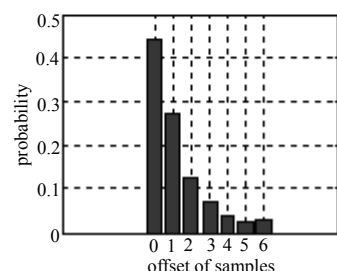
Fig.4 Performance of packet detector in this paper under different channel lengths  
图4 不同信道长度下的分组检测性能



(a) new scheme proposed in this paper



(b) CC



(c) CC+multiplex

Fig.5 Performance of fine symbol timing for different schemes  
图5 不同方案的符号精定时性能(CM1,-8.4 dB,1000个分组)

## 4 结论

本文为 MB-OFDM UWB 接收系统设计了一个高效的分组检测器,该分组检测器在传统互相关的基础上,利用延迟复乘和累积多径能量同时实现高性能的分组检测和符号精定时,同时本文还为该系统设定了合适的阈值,并通过仿真给出了累积多径能量时所需的最佳信道长度,最后分析了利用分组检测方案的符号精定时性能。

### 参考文献:

- [ 1 ] European Computer Manufacturers Association Standard ECMA-368. High Rate Ultra Wideband PHY and MAC Standard[S]. European:European Computer Manufacturers Association, 2008.
- [ 2 ] Schmidl T M,Cox D C. Robust frequency and timing synchronization for OFDM[J]. IEEE Trans. Commun., 1997,45(12): 1613-1621.
- [ 3 ] Chang Wei-Che,Chen Lin-Hung,Liao Wan-Chun,et al. An Area and Power Efficient Frame Synchronizer for 480Mb/s OFDM-based UWB System[D]. Taiwan:National Chiao Tung University, 2005.
- [ 4 ] KIM Byoung-Hak,Shin Cheol-Ho,CHOI Sangsung. Packet Detection Scheme using Cross Correlation and Complex Multiplication in MB-OFDM UWB System[C]// The 6th International Conference on Information,Communications&Signal Processing. Singapore:[s.n.], 2007.
- [ 5 ] Fan Wen,Choy Chiu-Sing,Leung Ka Nang. Robust and Low Complexity Packet Detector Design for MB-OFDM UWB[C]// IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Taipei:[s.n.], 2009.
- [ 6 ] Foerster J. Channel Modeling Sub-Committee Report[C]// IEEE P802.15 Wireless Personal Area Networks. USA:[s.n.], 2003.
- [ 7 ] Ye Z,Duan C,Orlik P,et al. A Low-Complexity Synchronization Design for MB-OFDM Ultra-wideband System[C]// IEEE International Conference. Beijing:[s.n.], 2008.

### 作者简介:



孙金芝(1986-),女,江苏省宿迁市人,在读硕士研究生,主要研究方向为多带 OFDM 超宽带系统的同步方案以及相关的硬件实现.email:109598323@qq.com.

王钱砚(1985-),男,江苏省盐城市人,在读硕士研究生,主要研究方向为电磁兼容、通信网络。

(上接第 564 页)

- [11] 聂聪,吕振恕. 基于可变数据重用因子的仿射投影算法[J]. 山东大学学报, 2008,38(1):36-38. (NIE Cong,LV Zhensu. A variable step-size affine projection algorithm based on a variable data-reuse factor[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2008,38(1):36-38.
- [12] Shin H C,Sayed A H,Song W J. Variable Step-Size NLMS and Affine Projection Algorithms[J]. IEEE Lett. Signal Processing, 2004,11(2):132-135.

### 作者简介:



彭最亮(1986-),男,湖南省岳阳市人,在读硕士研究生,主要研究方向为图像处理、自适应滤波器等.email:082021036@fudan.edu.cn.

李锋(1946-),男,上海市人,教授,博士生导师,主要研究方向为电路与系统理论、网络图论、故障测试与诊断、数字信号处理等。